Вісник Астрономічної школи | Astronomical School's Report

ISSN 1607–2855

Том 7 • № 1 • 2011 С. 104 – 107

УДК 524.1+524.7

Кореляція космічних променів надвисоких енергій з найближчими джерелами

О. Сущов, Б.І. Гнатик, О. Кобзар, В.В. Марченко

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

В роботі моделюється рух космічних променів надвисоких енергій різного хімічного складу від двох найближчих до Сонячної системи джерел — радіогалактик Centaurus A та Virgo A. Аналізується можливість кореляції подій, зареєстрованих обсерваторіями AUGER та AGASA, з цими об'єктами. Порівнюються результати розрахунків для різних моделей галактичного магнітного поля.

КОРРЕЛЯЦИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ С БЛИЖАЙШИМИ ИСТОЧНИКАМИ, Сущов О., Гнатик Б.І., Кобзар О., Марченко В.В. — В работе моделируется движение космических лучей сверхвысоких энергий разного химического состава от двух ближайших к Солнечной системе источников — радиогалактик Centaurus A и Virgo A. Анализируется возможность корреляции событий, зарегистрированных обсерваториями AUGER и AGASA, с этими объектами. Проводится сравнение расчетных результатов для различных моделей галактического магнитного поля.

CORRELATION OF ULTRAHIGH ENERGY COSMIC RAYS WITH NEAREST SOURCES, by Sushchov O., Gnatyk B.I., Kobzar O., Marchenko V.V. — Propagation of ultrahigh energy cosmic rays of different chemical composition from Centaurus A and Virgo A is modeled. Correlation possibility of events registered by AUGER and AGASA observatories with these two nearest to the Solar system objects is analyzed. Calculated results for the different galactic magnetic field models are compared.

Ключевые слова: космические лучи сверхвысокой энергии; химический состав космических лучей в Солнечной системе; источники космических лучей.

Key words: ultrahigh energy cosmic rays; chemical composition of cosmic rays in the Solar system; cosmic rays sources.

1. ВСТУП

Космічними променями (КП) називають високоенергетичні субатомні частинки, фотони чи нейтрино, які надходять з космічного простору і, взаємодіючи з ядрами атмосферних газів, породжують широкі атмосферні зливи вторинних елементарних частинок. Енергії, які перевищують 10^{19} еВ, прийнято вважати надвисокими. Космічні промені надвисоких енергій (КПНВЕ) мають позагалактичне походження, що підтверджується спостереженням так званого ГЗК-обрізання [1, 2] енергетичного спектру в експерименті HiRes [3] та Pierre Auger Observatory [4]. Це обмежує відстані, з яких можливо зареєструвати частинки надвисоких енергій [5, 6]. Завдяки цьому кількість зареєстрованих КПНВЕ незначна.

Існує певна анізотропія у напрямках приходу КПНВЕ з різних ділянок небесної сфери [4, 7]. Із 69 зареєстрованих подій з енергією, яка перевищує 55 ЕеВ [4] 15 походять з небесного регіону в околі найближчої до нас радіогалактики Centaurus A, в якій існують фізичні умови сприятливі для прискорення частинок до таких енергій [8]. Тому дослідження можливості походження КПНВЕ з цієї радіогалактики є актуальним. З іншого боку, в околі іншої близької до нас активної галактики Virgo A космічних променів надвисоких енергій не зареєстровано. Цей факт також потребує аналізу.

2. РУХ КПНВЕ В МАГНІТНИХ ПОЛЯХ

Для розв'язання поставленої задачі ми моделювали рух КПНВЕ в магнітному полі, оскільки воно викривляє траєкторію руху заряджених частинок внаслідок дії сили Лоренца. Розрахунок траєкторії проводився шляхом чисельного моделювання за методом Рунге–Кутта.

Ми враховували вплив як галактичного, так і позагалактичного магнітних полів. Магнітне поле галактики має регулярну та випадкову компоненти, проте вплив останньої на рух частинок з надвисокою енергією у масштабах галактики є несуттєвим, тому ми нехтували ним у першому наближенні.

З-поміж існуючих моделей галактичного магнітного поля ми обрали дві [9, 10]. Вони передбачають розклад магнітного поля на дискову компоненту та поле галактичного гало, що містить дипольну та тороїдальну складові. Складові поля диску в циліндричних координатах задаються виразами

$$B_r = B(r,\theta,z)\sin p, \qquad B_u = B(r,u,z)\cos p, \qquad B_z = 0.$$

Таблиця 1. Значення параметрів у використовуваних моделях регулярного галактичного магнітного поля

Модель поля	p, градуси	ξ_0, кпк	z_0, кпк	B_0, мкГс	R_T, кпк	w, кпк	$B_{T\max}$, мкГс	μ_G, мкГс·кпк^3
Проуза–Шміда [8]	–10	9.0	1.0	3.0	15.0	0.3	1.0	100
Кахелеріс [9]	–8	10.0	0.2	4.8	8.5	0.3	1.5	123

Таблиця 2. Типи КПНВЕ, які корелюють з Centaurus A

Модель галактичного магнітного поля	Енергія КПНВЕ, ЕеВ				
	142	77	79	68	66
Без урахування позагалактичного магнітного поля					
Проуза–Шміда [9]	Mg	N–O	He	p	–
Кахелеріс [10]	–	–	He	p	p
З урахуванням позагалактичного магнітного поля					
Проуза–Шміда [9]	Na–Ar	C–F	He	p	–
Кахелеріс [10]	Ca–Fe	Mg–Ar	He–Be	p–He	p

де p (пітч-кут) — кут між вектором індукції поля в даній точці та перпендикуляром до радіус-вектора r в цій точці.

Функцію $B(r,u,z)$, як правило, моделюють рівнянням логарифмічної спіралі:

$$B(r,u,z)=B_0\frac{R}{r}\cos\left(u-\frac{1}{\operatorname{tg}p}\ln\frac{r}{o_0}\right)\exp\left(-\frac{|z|}{h}\right),$$

де $R=8{,}5$ кпк — відстань від центру Галактики до Сонця.

Для тороїдального поля використовується модель тонких дисків, розташованих над галактичною площиною та під нею. Компоненти тороїдального поля в декартових координатах задаються виразами

$$B_x=-B_T\operatorname{sign}z\left[1+\left(\frac{|z|-h}{w}\right)^2\right]^{-1}\cos\theta,\qquad B_y=B_T\operatorname{sign}z\left[1+\left(\frac{|z|-h}{w}\right)^2\right]^{-1}\sin\theta,$$

де $h=1.5$ кпк — висота дисків над та під галактичною площиною, w — півширина лоренцового розподілу.

Функція B_T має вигляд

$$B_T=B_{T\max}\left[\Theta(R_T-r)+\Theta(r-R_T)\exp\left(\frac{R_T-r}{R_T}\right)\right]$$

де Θ — функція Хевісайда, R_T — радіус диску з тороїдальним полем.

Дипольна компонента поля має такі складові:

$$B_x=-\frac{3\mu_G}{\rho^3}\cos\varphi\sin\varphi\sin\theta,\qquad B_y=-\frac{3\mu_G}{\rho^3}\cos\varphi\sin\varphi\cos\theta,\qquad B_z=\frac{\mu_G}{\rho^3}(1-3\cos^2\varphi),$$

де $\rho\equiv\sqrt{r^2+z^2}$, $\cos\varphi\equiv z/\rho$, $\sin\varphi\equiv r/\rho$, μ_G — магнітний дипольний момент. Числові значення параметрів для двох вибраних моделей наведено в табл. 1.

Для опису позагалактичного магнітного поля ми використовували модель кубічних комірок [11]. У межах кожної комірки магнітне поле задається однорідним, проте його напрям змінюється від однієї комірки до іншої випадковим чином. Для обмеження величини магнітного поля використовувався критерій [12]

$$B\sqrt{l_0}\leqslant 10^{-9}\,\text{Гс}\cdot\text{Мпк}^{1/2},$$

де B — індукція магнітного поля в комірці, l_0 — розмір комірки.

3. КОРЕЛЯЦІЯ КПНВЕ З CENTAURUS A

Нижче наведено деякі результати розрахунків, виконаних з використанням різних моделей галактичного магнітного поля (рис. 1 і 2). Колами з цифровими позначеннями показано положення подій, зареєстрованих обсерваторією AUGER. Кола з позначеннями хімічних елементів відповідають розрахованим положенням джерел КПНВЕ для зазначеного типу частинок. Радіуси всіх кіл відповідають експериментальній похибці детекторів AUGER в довірчому інтервалі 1σ. Результати, приведені на рис. 1, було отримано для моделі Проуза–Шміда [9], а на рис. 2 — для моделі Кахелеріса [10]. На рис. 1 і 2 також присутнє контурне зображення областей радіовипромінювання Centaurus A. В цих областях, як відомо [8], існують умови, необхідні для прискорення космічних променів до надвисоких енергій.

Накладання кіл, що відповідають розрахованим положенням джерел, на зображення Centaurus A було вибрано в якості критерію, за яким встановлювалась кореляція цих подій з даною галактикою. Причому врахування міжгалактичного поля лише розширювало область можливої локалізації джерела, не змінюючи його положення. Результати такого співставлення наведено в табл. 2. Числами в таблиці позначено енергію подій, зареєстрованих обсерваторією AUGER.

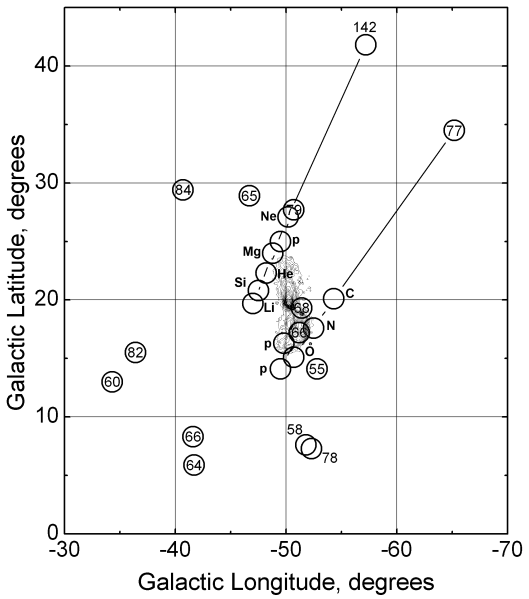

Рис. 1. Положення джерел КПНВЕ, розраховані згідно моделі [9].

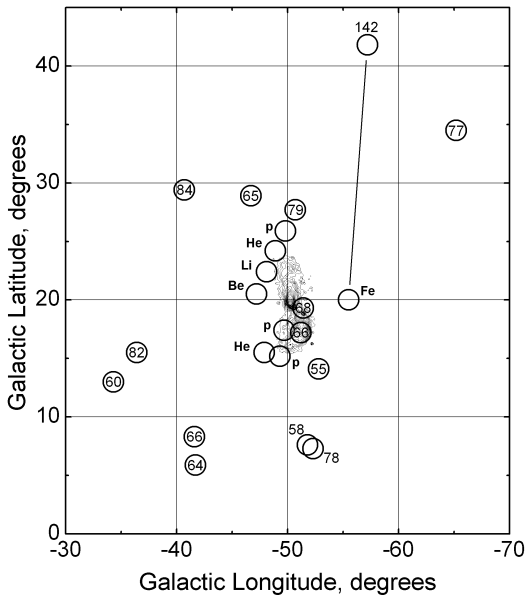

Рис. 2. Положення джерел КПНВЕ, розраховані згідно моделі [10].

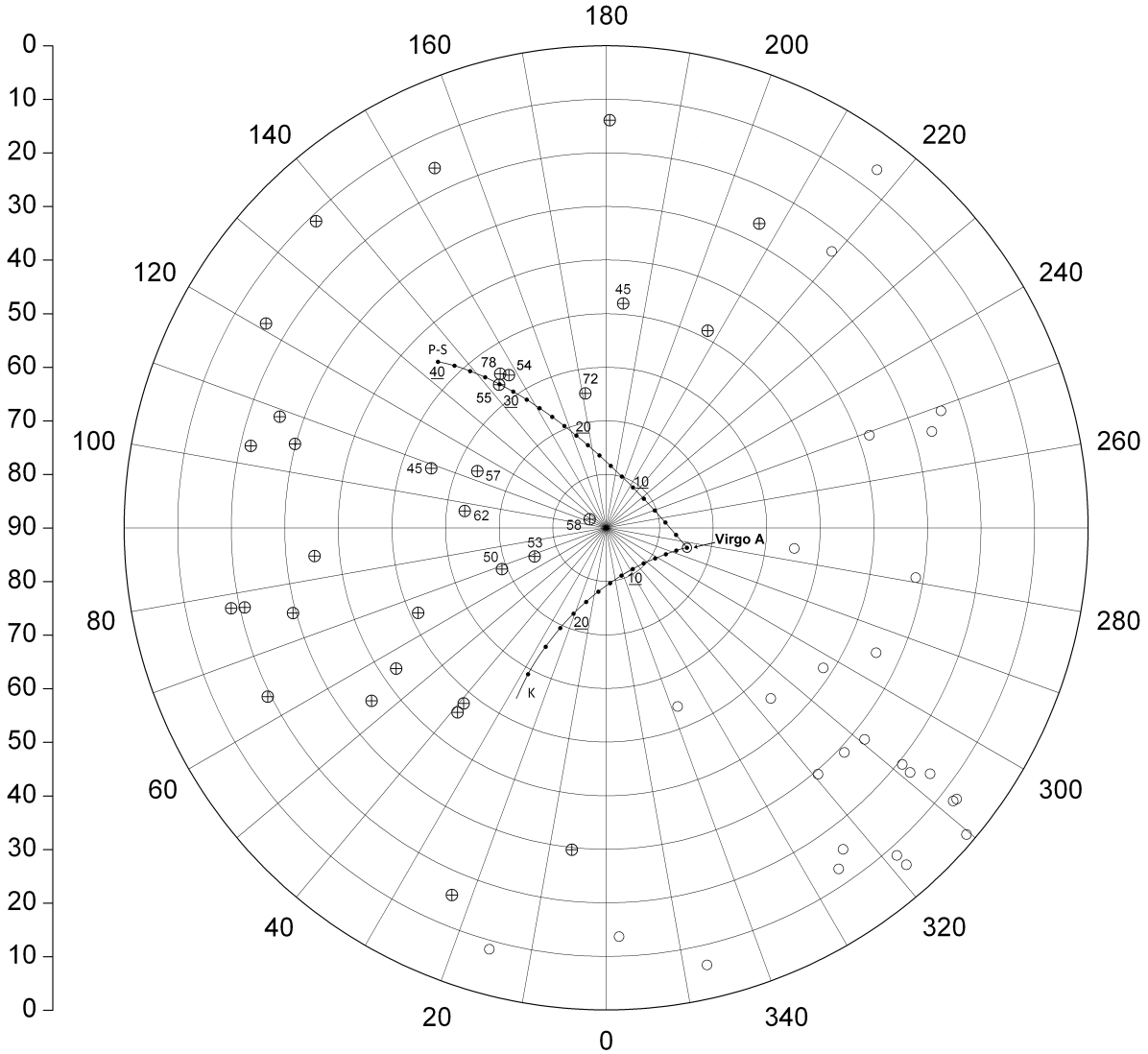

Рис. 3. Розраховані положення можливих подій КПНВЕ, прискорених в галактиці Virgo A. Точки на кривих — розраховані положення подій для різних Z (підкреслені числа). Порожні кола — події, зареєстровані обсерваторією AUGER. Кола з хрестами — події, зареєстровані обсерваторією AGASA. Числа біля подій — енергія (EeB).

4. КОРЕЛЯЦІЯ КПНВЕ З VIRGO A

Другою найближчою до нас активною галактикою після Centaurus A є Virgo A. Відстань до неї становить 16.4 ± 0.5 Мпк. Вона має більш масивне ядро і потужніший джет порівняно з Centaurus A, тому, згідно з існуючими уявленнями, там виконуються умови, необхідні для прискорення космічних променів до надвисоких енергій. Таким чином, Virgo A має бути не менш ефективним джерелом КПНВЕ, ніж Centaurus A. Проте, на відміну від Centaurus A, в околі Virgo A не було зареєстровано значної кількості космічних променів. Більш того, ця область небесної сфери взагалі виявилась бідною на події надвисоких енергій. Поясненням цього факту може бути значне відхилення КП, які надходять від Virgo A, в галактичних та міжгалактичних магнітних полях. Крім того, галактика Virgo A розташована на межі поля зору обсерваторії AUGER. Тому ми змоделювали рух КПНВЕ від цього джерела до Сонячної системи, щоб встановити область, де мали б реєструватися відповідні події.

Результати розрахунків, проведених для активної галактики Virgo A відповідно до двох моделей магнітного поля, представлено на рис. 3. Оскільки відхилення КП в магнітному полі визначається параметром E/Z, де E — енергія КП, а Z — заряд, ми задали значення енергії фіксованим $E = 10^{20}$ еВ, а Z змінювали з певним кроком. Точки, отримані для різних значень Z, утворюють криву, яка показує напрям відхилення КП в галактичному магнітному полі. Верхню криву на рис. 3 ($P-S$) отримано згідно з моделлю Проуза–Шміда, а нижню (K) — з моделлю Кахелеріса. Як бачимо, результати розрахунків для Virgo A за двома моделями суттєво відрізняються, тоді як для Centaurus A вони були подібними.

З рис. 3 видно, що КПНВЕ, прискорені в Virgo A, мали б відхилятися магнітним полем в область простору, недоступну для детекторів обсерваторії AUGER. Тому ми співставили результати розрахунків з даними обсерваторії AGASA. В цьому випадку для моделі Проуза–Шміда має місце узгодження розрахованих положень з деякими зареєстрованими подіями, в тому числі з кластером C2 [7]. При цьому для моделі Кахелеріса не спостерігається узгодження розрахованих положень з даними як AUGER, так і AGASA.

5. ВИСНОВКИ

Шляхом застосування вибраних моделей галактичного магнітного поля для двох найближчих об'єктів, які могли б бути джерелами КПНВЕ, було отримано наступне.

Centaurus A може бути джерелом ряду подій, зареєстрованих обсерваторією AUGER в його околі, причому дві моделі дають схожі результати з незначними відмінностями. Так, модель Проуза–Шміда дає краще узгодження, ніж модель Кахелеріса. Слід зазначити, що для обох моделей спостерігається спільна тенденція — більшим енергіям подій відповідають більші зарядові числа ядер.

Космічні промені, прискорені галактикою Virgo A, відхиляються магнітним полем в область простору, недоступну для детекторів обсерваторії AUGER. Проте для цього об'єкту дві застосовані моделі дають значні відмінності в локалізації можливих подій. В цьому випадку результати, отримані за моделлю Проуза–Шміда, узгоджуються з рядом подій, зареєстрованих обсерваторією AGASA, тоді як для моделі Кахелеріса узгодження не спостерігається.

Таким чином, модель Проуза–Шміда виявилась більш спроможною для пояснення відхилень КПНВЕ в магнітному полі.

1. *Greizen K.* End to the Cosmic-Ray Spectrum? // Phys. Rev. Lett. — 1966. — **16**. — P. 748–750.
2. *Zatsepin G.T., Kuzmin V.A.* Upper Limit of the Spectrum of Cosmic Rays. // JETP Lett. — 1966. — **4**. — P. 78–80.
3. *HiRes Collaboration. Abbasi R., et al.* First Observation of the Greisen-Zatsepin-Kuzmin Suppression // Phys. Rev. Lett. — 2008. — **100**. — P. 101101.
4. *The Pierre Auger Collaboration. Abraham J., et al.* Update on the correlation of the highest energy cosmic rays with nearby extragalactic matter // Astroparticle Physics. — 2010. — **34**. — P. 314.
5. *Harari D., Mollerach S., Roulet E.* On the ultra-high energy cosmic ray horizon // JCAP. — 2006. — 0611,012.
6. *Kachelrieβ M., Parizot E., Semikoz D.V.* The GZK horizon and constraints on the cosmic ray source spectrum from observations in the GZK regime // JETP Lett. — 2009. — **88**. — P. 553–557.
7. *Takeda M., et al.* Small-scale anisotropy of cosmic rays above 10^{19} eV Observed with the Akeno Giant Air Shower Array // Astrophys. J. — 1999. — **522**. — P. 225–237.
8. *Rieger F.M., Aharonian F.A.* Cen A as TeV gamma-ray and possible UHE cosmic-ray source // arXiv: astro-ph/0910.2327.
9. *Prouza M., Smida R.* The Galactic magnetic field and propagation of ultra-high energy cosmic rays // Astron. Astrophys. — 2003. — **410**. — P. 1–10.
10. *Kachelrieβ M., Serpico P.D., Teshima M.* The Galactic magnetic field as spectrograph for ultra-high energy cosmic rays // Astroparticle Physics. — 2007. — **26**, Issue 6. — P. 378–386.
11. *Wibig T.* Propagation of Ultra-High Energy Cosmic Rays in Extragalactic Magnetic Fields // Central Eur.J.Phys. — 2004. — **2**. — P. 277–299.
12. *Globus N., Allard D., Parizot E.* Propagation of high-energy cosmic rays in extragalactic turbulent magnetic fields: resulting energy spectrum and composition // Astronomy and Astrophysics. — 2008. — **479**, Issue 1. — P. 97–110.

Надійшла до редакції 12.09.2011